

УДК 691.421.2
EDN: DALUFV

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3\(634\)-34-41](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3(634)-34-41)

А.С. СУББОТИН¹, К.С. МОРОГОВ^{1,*}, Д.Д. БАЛЬХАЕВ¹, М.Д. ГЕТИГЕЖЕВ¹

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРОБЛЕННОГО ПЭТ-ПЛАСТИКА ДЛЯ ЗАМЕЩЕНИЯ МЕЛКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ

Аннотация

Введение. Накопление неразлагаемых пластиковых отходов, в частности полиэтилентерефталата (ПЭТ), является острой экологической проблемой. Поиск путей утилизации ПЭТ в строительных материалах позволяет снизить нагрузку на полигоны и сберечь природные ресурсы.

Цель. Экспериментальная оценка влияния частичной замены мелкого заполнителя дробленным ПЭТ-пластиком на физико-механические свойства мелкозернистого бетона.

Материалы и методы. Исследовались четыре состава бетона (цемент: песок = 1:3, В/Ц=0,55): контрольный (без добавок) и составы с заменой песка по объему на 5 %, 10 % и 15 % дробленным ПЭТ фракции 2–5 мм. Образцы-кубы 70 x 70 мм испытывались на прочность при сжатии, определялись средняя плотность и водопоглощение в возрасте 28 суток.

Результаты. Установлено, что введение пластика приводит к снижению средней плотности (до 8 % при 15 % ПЭТ) и прочности при сжатии. Наибольшая прочность из модифицированных составов зафиксирована при дозировке 5 % ПЭТ (падение на 12,5 % относительно контроля). Дальнейшее увеличение содержания пластика до 15 % вызывает резкое падение прочности (на 31 %) и рост водопоглощения в 2,1 раза.

Выводы. Оптимальной дозировкой, обеспечивающей приемлемые для ряда строительных растворов характеристики, является замена 5–10 % песка по объему. Полученный материал может быть рекомендован для ненесущих конструкций, тротуарной плитки и элементов благоустройства.

Ключевые слова: переработанный пластик, ПЭТ, мелкозернистый бетон, строительный раствор, утилизация отходов, прочность на сжатие, экологичные материалы, вторичные ресурсы

Для цитирования: Субботин А.С., Морогов К.С., Бальхаев Д.Д., Гетигежев М.Д. Возможность ис-

пользования дробленного ПЭТ-пластика для замещения мелкого заполнителя бетонной смеси // *Бетон и железобетон*. 2026. № 3 (634). С. 34–41. [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3\(634\)-34-41](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3(634)-34-41). EDN: DALUFV

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.04.26

Поступила после рецензирования 15.05.26

Принята к публикации 21.05.26

A.S. SUBBOTIN¹, K.S. MOROGOV^{1,*}, D.D. BALKHAEV¹, M.D. GETIGEZHEV¹

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26,
Moscow, 129337, Russian Federation

POSSIBILITY TO USE CRUSHED PET PLASTIC TO REPLACE THE FINE FILLER IN CONCRETE MIXTURE

Abstract

Introduction. The accumulation of non-degradable plastic waste, in particular polyethylene terephthalate (PET), is an acute environmental problem. Finding ways to recycle PET in building materials can reduce the load on landfills and conserve natural resources.

Aim. Experimental evaluation of the effect of partial replacement of fine aggregate with crushed PET plastic on the physico-mechanical properties of fine-grained concrete.

Materials and methods. Four concrete compositions were studied (cement: sand = 1:3, W/C=0.55): control (without additives) and compositions with the replacement of sand by volume by 5 %, 10 % and 15 % with crushed PET fractions of 2–5 mm. The 70 x 70 mm cube samples were tested for compressive strength, average density and water absorption were determined at the age of 28 days.

Results. It was found that the introduction of plastic leads to a decrease in average density (up to 8 % with 15 % PET) and compressive strength. The highest strength of the modified formulations was recorded at a dosage of 5 % PET (a decrease of 12.5 % relative to the control). A further increase in the plastic content to 15 % causes a sharp drop in strength (by 31 %) and a 2.1-fold increase in water absorption.

Conclusions. The optimal dosage, which provides acceptable characteristics for a number of building solutions, is the replacement of 5–10 % of sand by volume. The resulting material can be recommended for curtain structures, paving slabs and landscaping elements.

Keywords: recycled plastic, PET, fine-grained concrete, mortar, waste disposal, compressive strength, environmentally friendly materials, secondary resources

For citation: Subbotin A.S., Morogov K.S., Balkhaev D.D., Getigezhev M.D. Possibility to use crushed pet plastic to replace the fine filler in concrete mixture. *Concrete and reinforced concrete*, 2026, no. 3 (634), pp. 34–41. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3\(634\)-34-41](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3(634)-34-41). EDN: DALUFV

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 01.04.26

Revised 15.05.26

Accepted 21.05.26

Authors contribution statement

All the authors have made an equal contribution to the preparation of the publication.

Введение

Ежегодный рост производства пластических масс сопровождается пропорциональным увеличением объема отходов. На долю ПЭТ-упаковки приходится около 12 % глобального объема твердых бытовых отходов. Полиэтилентерефталат (ПЭТ), широко используемый в производстве бутылок и упаковки (мировой объем рынка в 2025 году – 31,34 млн тонн), обладает высокой химической стойкостью и практически не разлагается в естественных условиях, что приводит к его накоплению на полигонах твердых коммунальных отходов. Полиэтилентерефталат (ПЭТ), широко используемый в производстве бутылок и упаковки, обладает высокой химической стойкостью и практически не разлагается в естественных условиях, что приводит к его накоплению на полигонах твердых коммунальных отходов. В связи с этим остро стоит проблема поиска эффективных и экономически целесообразных методов утилизации ПЭТ-отходов [1].

Одним из перспективных направлений является использование дробленого пластика в строительной индустрии в качестве заполнителя для бетонов и растворов. Это позволяет не только снизить объем захоронений, но и сократить потребление природного песка, добыча которого наносит ущерб окружающей среде. Обзор научной литературы показывает значительный интерес исследователей к данной теме. Отмечается, что добавление пластиковых волокон может улучшить прочность на изгиб при малых дозировках, однако увеличение содержания пластика свыше 1,5 % ведет к снижению прочностных показателей из-за слабой адгезии [2, 3]. Авторы работы, исследовавшие бетоны марок М15, М20 и М25 с заменой песка на ПЭТ до 20 %, также подтверждают тенденцию снижения прочности при сжатии с ростом содержания пластика [4]. Исследование показывает, что при высоких дозировках ПЭТ (25 % и 50 %) снижение прочности носит критический характер, однако при этом значительно уменьшается плотность и теплопроводность материала, что позволяет классифицировать его как легкий бетон. В работе изучалось применение микро-измельченного ПЭТ в бетонных блоках для мощения и был сделан вывод о перспективности использования пластика при дозировках 5–10 %, несмотря на некоторое падение прочности. Анализ показывает, что пластиковый заполнитель пригоден для получения бетонов низкой и средней прочности, при этом оптимальное содержание может варьироваться в зависимости от типа пластика и рецептуры. Исследование итальянских ученых подтверждает, что более мелкая фракция ПЭТ позволяет достичь более высокой прочности по сравнению с крупной, что важно учитывать при подготовке сырья.

Целью данной работы является экспериментальная оценка возможности частичной замены песка дробленным ПЭТ-пластиком местного происхождения в составе мелкозернистого бетона для определения оптимального процента замещения, обеспечивающего приемлемые физико-механические характеристики.

Особую озабоченность вызывает проблема утилизации полиэтилентерефталата (ПЭТ), который составляет значительную долю в структуре твердых коммунальных отходов. Согласно открытым данным, ежегодно в России образуется около 70 млн тонн ТКО, из которых на долю пластика приходится до 10–15 %, при этом перерабатывается не более 10 % пластиковых отходов. Остальной объем вывозится на полигоны, где срок естественного разложения ПЭТ-бутылок составляет не менее 150–200 лет. В процессе захоронения пластик выделяет токсичные соединения, загрязняющие почвы и грунтовые воды, а при сжигании – опасные диоксины. В этом контексте вовлечение пластиковых отходов в хозяйственный оборот в качестве вторичного сырья для строительной индустрии приобретает не только экономическое, но и критическое экологическое значение.

Строительная отрасль, являясь одним из крупнейших потребителей природных ресурсов, открывает широкие возможности для утилизации отходов. Замена природного песка, добыча которого связана с нарушением ландшафтов и истощением месторождений, на техногенное сырье позволяет решать сразу две задачи: снижение нагрузки на окружающую среду и сокращение себестоимости строительных материалов. Однако широкому внедрению пластиковых заполнителей препятствует недостаточная изученность их влияния на долговечность и эксплуатационные характеристики бетонов, особенно в условиях переменных температур и влажности, характерных для климата большинства регионов России.

Материалы и методы

В работе использовались следующие материалы:
Вяжущее: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (ПЦ 500-Д0) производства ООО «Мордовцемент». Нормальная плотность цементного теста 26,5 %, активность (прочность при сжатии в возрасте 28 сут.) – 49,8 МПа.

Мелкий заполнитель: песок кварцевый с модулем крупности $M_k=2,1$, насыпной плотностью 1520 кг/м³, истинной плотностью 2650 кг/м³.

Пластиковый заполнитель: изготавливался из использованных ПЭТ-бутылок от напитков, собранных в г. Саранске. Бутылки очищались от этикеток и остатков содержимого, промывались и высушивались. Дробление производилось на лабораторной щековой дробилке с последующим рассеивом на ситах. Для исследования отбиралась фракция, близкая к песку: 2–5 мм. Насыпная плотность дробленого ПЭТ составила 420 кг/м³.

Вода: вода водопроводная, соответствующая требованиям ГОСТ 23732–2011.

Составы бетонной смеси

Было изготовлено четыре серии образцов. За контрольный принят состав с соотношением Ц:П = 1:3 по массе при водоцементном отношении В/Ц = 0,55. В опытных составах часть песка заменяли на дробленый ПЭТ по объему, так как замена по массе привела бы к значительному изменению объемных характеристик смеси из-за разницы в плотности материалов. Составы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Составы исследуемых мелкозернистых бетонов

Table 1

Compositions of the studied fine-grained concretes

Номер состава	Обозначение	Замещение песка по объему, %	Цемент, г	Песок, г	ПЭТ, г	Вода, г
1 (Контроль)	ПЭТ-0	0	450	1350	0	247
2	ПЭТ-5	5	450	1282	30	247
3	ПЭТ-10	10	450	1215	60	247
4	ПЭТ-15	15	450	1147	90	247

Методика испытаний

Для каждого состава изготавливались образцы кубы размером 70 x 70 x 70 мм. После формования образцы твердели в нормальных условиях ($t=20\pm 2^\circ\text{C}$, влажность $>95\%$) в течение 28 суток. Для каждого состава и срока испытаний изготавливалось по 6 образцов. Испытания проводились согласно ГОСТ 10180–2012 [5]:

- **Прочность на сжатие** определялась на гидравлическом прессе.

- **Среднюю плотность** вычисляли по результатам измерений и взвешивания образцов.

- **Водопоглощение** определяли по ГОСТ 12730.3–2020 [6] путем насыщения образцов водой.

Процесс подготовки пластикового заполнителя включал несколько последовательных этапов. На первом этапе осуществлялся сбор использованных ПЭТ-бутылок из-под напитков емкостью 0,5–2,0 л на территории г. Саранска. Отобранная тара подвергалась визуальному контролю для исключения бутылок с признаками биологического поражения и сильного загрязнения. Далее производилось отделение полипропиленовых этикеток и полиэтиленовых пробок, которые относятся к другим типам полимеров и могут неконтролируемо влиять на свойства композита. После удаления инородных включений бутылки тщательно промывались в теплой воде с добавлением моющего средства для удаления остатков органи-

ческих веществ и клеевых составов, после чего высушивались при комнатной температуре в течение 48 часов.

Для измельчения использовалась лабораторная щековая дробилка ДЩ 60 x 100, позволяющая регулировать ширину разгрузочной щели. Выбор данного типа оборудования обусловлен необходимостью получения частиц преимущественно изометрической формы с шероховатой поверхностью скола, что потенциально может улучшить сцепление с цементным камнем по сравнению с гладкими частицами, получаемыми при резке. Процесс дробления осуществлялся в несколько проходов с промежуточным сеевом для исключения переизмельчения материала. Полученная дробленка сеевалась на лабораторном виброгрохоте через стандартный набор сит с ячейками 5, 2 и 1 мм. Для дальнейших исследований отбиралась фракция 2–5 мм, как наиболее близкая по granulometрии к используемому кварцевому песку. Частицы мельче 2 мм и крупнее 5 мм отсеивались и не использовались в работе для обеспечения сопоставимости результатов.

Результаты

Результаты испытаний образцов в возрасте 28 суток представлены в таблице 2. Для анализа принимались средние арифметические значения по серии образцов.

Таблица 2

Физико-механические свойства мелкозернистого бетона с добавкой ПЭТ

Table 2

Physical and mechanical properties of fine-grained concrete with PET additive

Показатель	Состав ПЭТ-0 (контроль)	Состав ПЭТ-5	Состав ПЭТ-10	Состав ПЭТ-15
Средняя плотность, кг/м ³	2215	2150	2070	1950
Прочность на сжатие, МПа	38,6	33,8	28,5	26,6
Водопоглощение, % по массе	4,8	5,4	6,9	10,1

Помимо количественных показателей, в ходе эксперимента были зафиксированы важные визуальные наблюдения, характеризующие поведение материала под нагрузкой и особенности структуры. Контрольные образцы (ПЭТ-0) разрушались хрупко с характерным звонким звуком и распадались на несколько крупных фрагментов. Образцы с добавлением пластика демонстрировали иную картину разрушения: при достижении

предельной нагрузки в теле образца образовывались трещины, однако полного распада на части не происходило, образцы сохраняли целостность формы. Это может свидетельствовать о повышении вязкости разрушения и способности материала сопротивляться динамическим нагрузкам за счет армирующего эффекта пластиковых частиц, которые работают как «связки», препятствующие раскрытию трещин.

Визуальный осмотр поверхности скола образцов ПЭТ-15 после испытаний позволил выявить наличие частиц пластика, выкрошившихся из матрицы, а также пор и раковин в зоне контакта. Это подтверждает предположение о недостаточной адгезии цементного камня к гидрофобной поверхности ПЭТ. На образцах ПЭТ-5 подобные дефекты встречались реже, что коррелирует с менее значительным падением прочности для данного состава. Также отмечено, что цвет скола опытных образцов приобретал неравномерный оттенок за счет включений окрашенных частиц пластика (от белых до зеленых и коричневых), что не оказывает влияния на прочностные характеристики, но может быть использовано в декоративных целях при производстве тротуарной плитки или фасадных элементов.

Анализ результатов показывает, что с увеличением доли пластикового заполнителя наблюдается закономерное снижение средней плотности бетона. Для состава ПЭТ-15 плотность снизилась на 11,9 % по сравнению с контролем, что объясняется значительно меньшей плотностью частиц ПЭТ по сравнению с кварцевым песком.

Прочность на сжатие также снижается при введении ПЭТ. Наименьшее падение прочности (на 12,5 %) зафиксировано для состава ПЭТ-5. Увеличение дозировки до 10 % привело к падению прочности на 26,2 %, а до 15 % – на 31,1 %. Визуально при разрушении образцов с пластиком наблюдалась более пластичная картина разрушения по сравнению с хрупким разрушением контрольных образцов.

Водопоглощение бетона возрастает с увеличением содержания ПЭТ. Для состава ПЭТ-15 этот показатель увеличился более чем в два раза по сравнению с контролем, что свидетельствует о росте объема открытых пор.

Выводы

Полученные данные хорошо коррелируют с результатами других исследователей. Снижение прочности при сжатии, зафиксированное в нашем эксперименте, согласуется с выводами Orie и Olusesi [7], которые при замене песка на дробленый ПЭТ в бетоне марки М25 зафиксировали снижение прочности на сжатие на 11,38 %, 27,48 %, 36,24 % и 42,40 % при содержании ПЭТ 5 %, 10 %, 15 % и 20 % соответственно. Аналогичные результаты были получены Alam с соавторами [8] при исследовании бетонов марок М15, М20 и М25 с заменой песка на ПЭТ до 20 % – максимальное снижение прочности составило 46,51 %. Схожая тенденция подтверждается в работе AL-Darzi с соавторами [4], где при 16 % замещения песка ПЭТ зафиксировано снижение прочности на 19,9 %. Основной причиной, как отмечают исследователи, является низкая адгезия между гидрофобной поверхностью частиц пластика и гидрофильной цементной матрицей, что приводит к формированию более пористой и широкой переходной зоны на границе раздела фаз. Снижение прочности при сжатии, зафиксированное в нашем эксперименте, согласуется с выводами, которые также отмечали обратно пропорциональную зависимость между содержанием ПЭТ и прочностью. Основной причиной является низкая

адгезия между гидрофобной поверхностью частиц пластика и гидрофильной цементной матрицей. Это приводит к формированию слабого контактного слоя (зоны интерфейса), по которому и происходит зарождение и развитие трещин под нагрузкой.

Снижение плотности ожидаемо и обусловлено разницей в плотности песка (2650 кг/м³) и ПЭТ (~1300–1400 кг/м³). Рост водопоглощения связан с наличием пор в зоне контакта «цементный камень – пластик», а также, возможно, с тем, что неправильная форма некоторых пластиковых частиц препятствует плотной упаковке зерен заполнителя.

В отличие от работ, где исследовались фибры, мы использовали дробленый пластик, что не привело к росту прочности, однако тенденция к более вязкому разрушению (образцы не разлетались на части, а сохраняли форму после испытаний) была отмечена визуально, что косвенно подтверждает повышение деформативности материала.

Сравнивая наши результаты с данными, где использовались высокие дозировки (25–50 %), можно заключить, что для сохранения приемлемой для конструктивных растворов прочности (классов В15–В25) целесообразно ограничиться замещением песка в пределах 5–10 %. Полученный нами состав ПЭТ-5 (прочность 33,8 МПа) соответствует классу В25, а ПЭТ-10 (28,5 МПа) – классу В22,5, что позволяет рекомендовать их для изготовления тротуарной плитки, бордюрного камня, стяжек и других не несущих элементов, где требования к прочности не являются критическими, а экологический эффект от утилизации пластика и снижения массы изделия может быть востребован.

Анализ полученных результатов позволяет выделить два основных механизма, ответственных за снижение прочностных характеристик при введении ПЭТ. Первый механизм связан с физическим эффектом замещения: частицы пластика, имеющие модуль упругости значительно ниже, чем у цементного камня и кварца, работают в структуре бетона как «слабые включения» или зоны концентрации напряжений. При приложении нагрузки вокруг таких частиц возникают касательные напряжения, инициирующие микротрещинообразование. Второй механизм обусловлен химической природой поверхности пластика. ПЭТ является гидрофобным материалом, в то время как цементный клей обладает гидрофильной природой. Это приводит к отталкиванию воды от поверхности пластика в процессе гидратации цемента и формированию вокруг частиц ПЭТ более пористой и менее прочной контактной зоны (так называемого «эффекта ореола»).

Следует отметить ограничения данного исследования. Во-первых, использовалась одна фиксированная фракция пластика (2–5 мм), в то время как ряд исследователей указывает на влияние формы и размера частиц на свойства композита. Во-вторых, не проводилась химическая или термическая модификация поверхности пластика, которая могла бы улучшить адгезию. В-третьих, исследования проводились в относительно короткие сроки (28 суток), что не позволяет судить о долговечности материала. Вероятно, со временем про-

цессы деструкции в зоне контакта могут усугубляться под действием циклического замораживания–оттаивания, что требует дополнительных исследований. Несмотря на это, полученные данные могут служить основой для подбора составов при производстве изделий, не испытывающих высоких нагрузок.

Заключение

В результате выполнения экспериментального исследования, посвященного оценке влияния частичной замены мелкого заполнителя дробленным ПЭТ-пластиком на физико-механические свойства мелкозернистого бетона, были получены следующие выводы и умозаключения.

Подтверждена принципиальная технологическая возможность применения дробленого ПЭТ-пластика фракции 2–5 мм в качестве частичного заместителя песка по объему в составе мелкозернистого бетона. Приготовление бетонных смесей с содержанием пластика до 15 % от объема песка не вызывало затруднений, смеси сохраняли удовлетворительную удобоукладываемость, не расслаивались и не требовали корректировки водоцементного отношения. Это свидетельствует о том, что пластиковый заполнитель, прошедший предварительную очистку и классификацию, может быть интегрирован в стандартную технологию приготовления бетонных смесей без существенного изменения производственного регламента.

Установлена закономерная обратная зависимость между содержанием ПЭТ-заполнителя и средней плотностью бетона. При увеличении доли замещения с 0 % до 15 % плотность снизилась на 11,9 % (с 2215 кг/м³ до 1950 кг/м³). Данный эффект обусловлен прежде всего значительной разницей в истинной плотности кварцевого песка (2650 кг/м³) и ПЭТ-пластика (~1350 кг/м³). При этом снижение плотности носит практически линейный характер, что позволяет прогнозировать этот параметр для составов с промежуточными дозировками. Полученные значения плотности позволяют классифицировать материалы с содержанием пластика 10 % и выше, как легкие бетоны, что расширяет сферу их потенциального применения в конструкциях, где снижение массы является важным требованием.

Экспериментально подтверждено, что введение пластикового заполнителя приводит к снижению прочности на сжатие. Выявлена нелинейная зависимость: наиболее критичное падение прочности происходит при увеличении дозировки с 10 % до 15 %, где относительное снижение прочности составило 31,1 % по сравнению с контролем. Анализ полученных данных позволяет выделить два ключевых фактора, определяющих этот эффект:

- *Структурно-механический фактор*: частицы пластика, обладающие более низким модулем упругости по сравнению с цементным камнем и кварцевым песком, выступают в роли «слабых включений», инициирующих концентрацию напряжений и преждевременное трещинообразование при нагружении.

- *Адгезионный фактор*: гидрофобная поверхность ПЭТ обладает низким сродством к гидрофильной

цементной матрице, что приводит к формированию в зоне контакта пористой структуры с пониженной прочностью («эффект ореола»). Визуальное подтверждение этому – наличие выкрошившихся частиц пластика на поверхности скола образцов, особенно при дозировке 15 %.

Вместе с тем, визуальные наблюдения за характером разрушения свидетельствуют о повышении вязкости разрушения и деформативности модифицированных составов. Образцы с пластиком не распадались на фрагменты при достижении предельной нагрузки, а сохраняли целостность формы, что может быть интерпретировано как наличие армирующего эффекта и способности материала к перераспределению напряжений.

Зафиксирован значительный рост водопоглощения с увеличением содержания пластика. Для состава ПЭТ-15 водопоглощение увеличилось в 2,1 раза по сравнению с контролем (с 4,8 % до 10,1 %). Это является косвенным показателем увеличения объема открытых пор, которые формируются преимущественно в контактной зоне «цементный камень – пластик». Полученные данные указывают на потенциальное снижение морозостойкости материалов с высоким содержанием ПЭТ, что требует осторожности при их применении в условиях знакопеременных температур и воздействия влаги. Для регионов с холодным климатом, к которым относится большая часть территории России, данный фактор является критическим и требует дополнительных исследований по морозостойкости.

Сопоставление полученных результатов с требованиями нормативных документов к строительным растворам и бетонам позволяет сделать вывод об оптимальном диапазоне замещения песка дробленным ПЭТ-пластиком. Наиболее сбалансированным по комплексу показателей является состав с замещением 5 % по объему (ПЭТ-5), который демонстрирует:

- прочность на сжатие 33,8 МПа, что соответствует классу В25;
- снижение прочности относительно контроля всего на 12,5 %, что является приемлемым для многих областей применения;
- умеренный рост водопоглощения (с 4,8 % до 5,4 %);
- снижение средней плотности на 3 %.

Состав ПЭТ-10 (прочность 28,5 МПа, класс В22,5) также может быть рекомендован для ненесущих конструкций и изделий, где требования к прочности не являются доминирующими. Дальнейшее увеличение дозировки до 15 % признается нецелесообразным из-за критического падения прочности (более 30 %) и существенного роста водопоглощения, что ставит под сомнение долговечность таких материалов.

Исходя из полученных результатов, разработанный материал может найти применение в следующих областях строительного производства:

- *Тротуарная плитка и элементы благоустройства*: снижение массы изделий облегчает транспортировку и монтаж, а наличие пластика может придавать дополнительную ударную вязкость;

- *Бордюрные камни и садовые дорожки*: умеренные прочностные требования и возможность использования цветного пластика для декоративных эффектов;

- *Стяжки и выравнивающие слои*: применение в помещениях с нормальным влажностным режимом;

- *Ненесущие перегородки и заполнение каркасов*: материал с пониженной плотностью снижает нагрузку на фундаменты.

При этом для конструкций, эксплуатируемых в условиях переменного увлажнения и отрицательных температур, а также для ответственных несущих элементов, применение пластикового заполнителя в исследованных дозировках без дополнительных мероприятий по модификации поверхности пластика или введению гидрофобизирующих добавок не рекомендуется.

Полученные результаты открывают ряд направлений для продолжения научной работы. В первую очередь, необходимы исследования по модификации поверхности частиц ПЭТ с целью повышения адгезии к цементной матрице. Перспективными методами могут быть:

- обработка поверхности растворами полимеров (например, латексами) или силиконовыми соединениями;

- механическая активация (создание шероховатости поверхности);

- использование плазменной обработки или коронного разряда;

- введение в состав смеси поверхностно-активных веществ (ПАВ), улучшающих смачиваемость пластика.

Также необходимы длительные испытания на морозостойкость, водостойкость и стойкость к биологической коррозии, которые позволят оценить долговечность материала в реальных условиях эксплуатации. Важным направлением является также исследование теплозащитных и звукоизоляционных свойств полученных композитов, поскольку снижение плотности может коррелировать с улучшением этих показателей. Кроме того, перспективным представляется изучение влияния формы частиц пластика (волокна, чешуйки, гранулы) на свойства композита для выявления оптимальной геометрии заполнителя.

Проведенное исследование подтверждает гипотезу о возможности вовлечения отходов ПЭТ-пластика в производство строительных материалов в качестве частичного заместителя природного песка. Несмотря на неизбежное снижение прочностных характеристик, при ограничении дозировки 5–10 % достигается баланс между экологическим эффектом (утилизация отходов, сохранение природных ресурсов), экономической целесообразностью (снижение стоимости материала за счет более дешевого заполнителя) и сохранением приемлемых эксплуатационных свойств. Разработанный материал может быть классифицирован как конструкционно-теплоизоляционный легкий бетон, находящийся применение в малоответственных и ненесущих элементах зданий и сооружений. Полученные результаты вносят вклад в развитие научного направления по утилизации техногенных отходов в строительстве и могут служить основой для разработки технологических регламентов

производства бетонных изделий с использованием вторичного полимерного сырья.

Список литературы

1. Qaidi S., Al-Kamaki Y., Hakeem I. et al. Investigation of the physical-mechanical properties and durability of high-strength concrete with recycled PET as a partial replacement for fine aggregates. *Frontiers in Materials*, 2023, vol. 10, 1101146. DOI: 10.3389/fmats.2023.1101146.
2. Piccinni A.F., Dell'Anna S., Lionetto F., Maffezzoli A. Physical and Mechanical Properties of Cement Mortars with Recycled Polyethylene Terephthalate: Influence of Grain Size and Composition. *Materials*, 2025, vol. 18(6), 1378. DOI: 10.3390/ma18061378.
3. Frigione M. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 2010, vol. 30(6), pp. 1101–1106. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.01.030.
4. AL-Darzi S.Y.K., Ibrahim K.A., Salih O.A. The Impact Load Behavior of Reinforced Concrete Slab Samples Containing Waste Plastic Aggregate. Tikrit. *Journal of Engineering Sciences*, 2024 DOI:10.25130/tjes.31.4.20.
5. ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Стандартинформ, 2013.
6. ГОСТ 12730.3–2020. Бетоны. Метод определения водопоглощения. М.: Стандартинформ, 2020.
7. Orie O.U., Olusesi O.J. (2023) Effect of partial replacement of aggregate with granulated polyethylene terephthalate (PET) on compressive strength of concrete. *Nigerian Journal of Technology*, 42(2). DOI: 10.4314/njt.v42i1.5.
8. Alam P., Mazhar M.A., Verma M., et al. Analysis of concrete properties with partial sand replacement by recycled plastic and its cost–benefit evaluation. *Frontiers in Materials*, 2025, vol. 12, article 719644 DOI:10.3389/fmats.2025.1719644.
9. Alam P., Mazhar M.A., Verma M. et al. Sustainability of utilizing recycled plastic fiber in green concrete: A systematic review. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, vol. 22, article e04432. DOI: 10.1016/j.cscm. 2025.e04432
10. Pervez A., Mazhar M.A., Verma M. et al. Analysis of concrete properties with partial sand replacement by recycled plastic and its cost–benefit evaluation. *Frontiers in Materials*, 2025, vol. 12, article 1719644. DOI: 10.3389/fmats.2025.1719644
11. Ouano C.A.E. An investigation of the mechanical properties of concrete with different types of waste plastics for rigid pavements. *Infrastructures*, 2025, vol. 6(1), 9. DOI: 10.3390/applmech610009.
12. Senthil K., Jakhar S., Khanna M., Rani K. A review on the application of plastic waste in the reinforced concrete structures. *Advances in materials Research*, 2024, vol. 13(2), pp. 115–128. DOI: 10.18720/MCE.91.7.
13. Córdoba L.I.Á., Martínez-Barrera G., Díaz C.E.B. et al. Effects on Mechanical Properties of Recycled PET in Cement-Based Composites. *International Journal of Polymer Science*, 2013, vol. 2013, 763276. DOI: 10.1155/2013/763276.

14. Saikia N., de Brito J. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 34, pp. 385–401. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.03.015.
15. Siddique R., Khatib J., Kaur I. Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*, 2008, vol. 28(10), pp. 1835–1852. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.09.011.

References

1. Qaidi S., Al-Kamaki Y., Hakeem I. et al. Investigation of the physical-mechanical properties and durability of high-strength concrete with recycled PET as a partial replacement for fine aggregates. *Frontiers in Materials*, 2023, vol. 10, article 1101146. DOI: 10.3389/fmats.2023.1101146.
2. Piccinni A.F., Dell'Anna S., Lionetto F., Maffezzoli A. Physical and Mechanical Properties of Cement Mortars with Recycled Polyethylene Terephthalate: Influence of Grain Size and Composition. *Materials*, 2025, vol. 18(6), 1378. DOI: 10.3390/ma18061378.
3. Frigione M. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 2010, vol. 30(6), pp. 1101–1106. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.01.030.
4. AL-Darzi S.Y.K., Ibrahim K.A., Salih O.A. The Impact Load Behavior of Reinforced Concrete Slab Samples Containing Waste Plastic Aggregate. *Tikrit. Journal of Engineering Sciences*, 2024 DOI:10.25130/tjes.31.4.20.
5. State Standard 10180–2012. Concretes. Methods for determining strength from control samples. Moscow: Standartinform, 2013.
6. State Standard 12730.3–2020. Concretes. A method for determining water absorption. Moscow: Standartinform, 2020.
7. Orie O.U., Olusesi O.J. Effect of partial replacement of aggregate with granulated polyethylene terephthalate (PET) on compressive strength of concrete. *Nigerian Journal of Technology*, 2023, 42(2). DOI: 10.4314/njt.v42i1.5.
8. Alam P., Mazhar M.A., Verma M., et al. Analysis of concrete properties with partial sand replacement by recycled plastic and its cost-benefit evaluation. *Frontiers in Materials*, 2025, vol. 12, article 1719644 DOI:10.3389/fmats.2025.1719644.
9. Alam P., Mazhar M.A., Verma M. et al. Sustainability of utilizing recycled plastic fiber in green concrete: A systematic review. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, vol. 22, e04432. DOI: 10.1016/j.cscm. 2025.e04432
10. Pervez A., Mazhar M.A., Verma M. et al. Analysis of concrete properties with partial sand replacement by recycled plastic and its cost-benefit evaluation. *Frontiers in Materials*, 2025, vol. 12, article 1719644. DOI:10.3389/fmats.2025.1719644
11. Ouano C.A.E. An investigation of the mechanical properties of concrete with different types of waste plastics for rigid pavements. *Infrastructures*, 2025, vol. 6(1), 9. DOI: 10.3390/applmech610009.
12. Senthil K., Jakhar S., Khanna M., Rani K. A review on the application of plastic waste in the reinforced concrete

structures. *Advances in materials Research*, 2024, vol. 13(2), pp. 115–128. DOI: 10.18720/MCE.91.7.

13. Córdoba L.I.Á., Martínez-Barrera G., Díaz C.E.B. et al. Effects on Mechanical Properties of Recycled PET in Cement-Based Composites. *International Journal of Polymer Science*, 2013, vol. 2013, article 763276. DOI: 10.1155/2013/763276.
14. Saikia N., de Brito J. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 34, pp. 385–401. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.03.015.
15. Siddique R., Khatib J., Kaur I. Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*, 2008, vol. 28(10), pp. 1835–1852. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.09.011.

Информация об авторах / Information about the authors

Субботин Артем Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики, НИУ МГСУ. Москва, Россия
e-mail: subbotin-art@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7191-0544>

Subbotin Artem S., candidate of technical sciences, associate professor of the department of construction of thermal and nuclear power facilities, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Moscow, Russia
e-mail: subbotin-art@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7191-0544>

Морогов Константин Сергеевич*, бакалавр, НИУ МГСУ. Москва, Россия

e-mail: kmorogoff@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2556-4212>

Konstantin S. Morogov*, bachelor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Moscow, Russia

e-mail: kmorogoff@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2556-4212>

Бальхаев Дмитрий Доржиевич, бакалавр, НИУ МГСУ. Москва, Россия e-mail: dima.balkhaev@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7551-0310>

Balkhaev Dmitry D., bachelor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Moscow, Russia

e-mail: dima.balkhaev@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7551-0310>

Гетигежев Марат Далимбекович, бакалавр, НИУ МГСУ. Москва, Россия

e-mail: getigezhev.04@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7599-33>

Getigezhev Marat D. bachelor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Moscow, Russia

e-mail: getigezhev.04@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7599-33>

*Автор, ответственный за переписку / Corresponding author